

Eero Ruhanen

VESISTÖTÄYTTÖJEN RAKENTAMINEN

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Eero Ruhanen: Vesistötäyttöjen rakentaminen, Land reclamation
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Huhtikuu 2019

Työn tarkoitus on ollut tutkia vesistötäyttöjen suunnittelua ja rakentamista suomalaisesta ja kansainvälisestä näkökulmasta. Työssä on selvitetty vesistötäyttöjen geoteknisessä suunnittelussa tarvittavat keskeiset tarkastelunäkökohdat. Tavoitteena on lisäksi ollut luetella rakennusvaiheet ja rakentamismenetelmät, ja vertailla niiden soveltumista erilaisiin kohteisiin. Ranta-Tampellan vesistötäytön rakentamista tutkimalla on pyritty tuomaan esille vesistötäytön käyttökohteiden erilaisia mahdollisuuksia ja tuoda esille rakentamisessa syntyviä mahdollisia ongelmatilanteita. Tutkimusmenetelmänä on käytetty kirjallisuustutkimusta ja haastattelua.

Vesistötäyttöjen geoteknisessä suunnittelussa keskeisimmät tarkastelukohteet ovat täytön ja sen alle jäävän maan stabiliteetti ja painuma. Pohjamaalla on keskeinen vaikutus painumiin. Täytön painumattomuuden kannalta olisi edullista, jos pehmeä pohjamaa poistettaisiin ennen täyttötyötä, jolloin täyttö tukeutuisi kantavaan pohjaan. Suomessa louhe on tyypillinen täyttömateriaali, koska se on ominaisuuksiltaan hyvin täyttöihin soveltuvaa ja vesistötäytöt toimivat kalliorakennuskohteista louhitun kallion sijoituskohteena. Hiekka on maailmanlaajuisesti paljon käytetty materiaali. Myös pehmeämpien materiaalien käyttö voi olla mahdollista.

Täyttötapoja on monia erilaisia, joista Suomessa selvästi yleisin on täytön rakentaminen maalta. Tällä menetelmällä on myös mahdollista syrjäyttää pehmeät pohjamaat käyttämällä pohjaantäyttöä. Tämä menetelmä oli käytössä Ranta-Tampellassa, joka on tässä työssä tutkittu esimerkkikohte. Pehmeät maat voidaan poistaa myös ruoppaamalla. Järviolosuhteissa ruoppauskaluston saaminen kohteeseen ei välttämättä ole mahdollista, mutta meriolosuhteissa ruoppaus on yleisessä käytössä. Täytön huolellinen tiivistäminen on olennaista, jotta rakentaminen sen päälle on mahdollista.

Ranta-Tampellassa uuden louhetäytön tärkeimpänä tehtävänä on tukea vanhaa täyttöä, parantaa sen stabiliteettia ja mahdollistaa rakentaminen lähemmäksi rantaviivaa. Tulevat rakennukset eivät sijoitu uuden täytön päälle pientä aluetta lukuun ottamatta. Tämän työn kannalta mielenkiintoista oli täytön siirtymien seurannan tulokset. Pohjaantäytöllä syrjäytetty savi ja täytön alle jääneet siltit painuivat, mikä aiheutti täyttöön sivusiirtymiä. Louhetäytön painumat painopenkeereen alla olivat vähäisiä, vaikka sitä ei syvästiivitetty kuin pieneltä alueelta. Tämä on osoitus materiaalin hyvästä soveltuvuudesta vesistötäyttöjen materiaaliksi. Suurin Ranta-Tampellan vesistötäytön rakentamisessa aiheutuneista ongelmista oli järven samentumista ehkäisevän siltiverhon repeily.

Avainsanat: Vesistötäyttö, geotekninen suunnittelu, Ranta-Tampella

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämän kandidaatintyön ohjaajana on toiminut Juho Mansikkamäki, jota myös haastatettiin Ranta-Tampellan esimerkkitapaukseen liittyen. Kiitän kaikkia, jotka ovat antaneet tästä työstä rakentavaa palautetta kirjoitusvaiheessa ja seminaariesityksen yhteydessä.

Tampereella, 18.4.2019

Eero Ruhanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VESISTÖTÄYTTÖJEN GEOTEKNINEN SUUNNITTELU	3
2.1 Suunnittelun lähtötietojen hankkiminen	3
2.2 Täyttömateriaalit	3
2.2.1 Louhe	3
2.2.2 Hiekka	4
2.2.3 Muut karkearakeiset materiaalit	4
2.2.4 Savi	4
2.2.5 Muut mahdolliset materiaalit	5
2.3 Geotekninen mitoitus	5
2.4 Stabiliateetti	6
2.4.1 Leikkauslujuus	6
2.4.2 Liukupinta-analyysi	7
2.5 Painuma	9
2.6 Eroosiosuojaus	10
3. TÄYTÖN RAKENNUSVAIHEET	12
3.1 Ruoppaus	12
3.2 Massanvaihto päätypengerryksellä	13
3.3 Käytetyt rakentamismenetelmät	14
3.3.1 Täytön rakentaminen maalta	14
3.3.2 Maan kuljetus pohjaluukkuproomulla	14
3.3.3 Hydraulinen täyttö	15
3.3.4 Hiekan levitys	15
3.3.5 Rantasuojauksen sisään täyttäminen	15
3.4 Tiivistys	15
3.4.1 Tiiviysaste	15
3.4.2 Tiivistystyö	16
4. RANTA-TAMPELLAN ESIMERKKITAPAUKSET	21
4.1 Kohteen kuvaus	21
4.2 Pohjasuhteet ja tehdyt pohjatutkimukset	22
4.3 Louhetäyttö	23
4.4 Täytön mitoitusperusteet ja suunnittelu	24
4.5 Pengerrystyö	25
4.6 Tiivistäminen	27
4.7 Painumat ja sivusiirtymät	28
4.8 Ympäristövaikutusten hallinta	29
5. YHTEENVETO	31
LÄHTEET	33

LYHENTEET JA MERKINNÄT

c	koheesio
u	huokosvedenpaine
σ	maan kokonaisjännitys
σ'	tehokas jännitys
T_f	maan leikkauslujuus
φ	maan kitkakulma
a	ulkoisen kuorman momenttivarso
F	varmuuskerroin
M_a	aktiivimomentti
M_p	passiivimomentti
l	leikkauspinnan pituus
Q	ulkoinen kuorma
R	ympyränkaaren muotoisen liukupinnan etäisyys pyörähdyskeskipisteestä
s	leikkauslujuus liukupinta-analysissä
W	lamellin paino
x	lamellin momenttivarso
S	kokonaispainuma
S_i	alkupainuma
S_k	konsolidaatiopainuma
S_s	jälkipainuma
S_t	sivusiirtymien aiheuttama painuma
w	vesipitoisuus
ρ	kuivairtoteiheyys
ρ_{\max}	maksimi-irtoteiheyys
D_{\max}	syvätiivistyksen enimmäissyvyysvaikutus
H	pudotuskorkeus
k	maalajista riippuva kokeellinen kerroin
W	pudotusjätkäleen paino

1. JOHDANTO

Kaupungistuminen on globaali megatrendi, ja sen vuoksi myös Suomessa on kasvava tarve saada lisää rakennusmaata kaupunkeihin keskustojen läheisyyteen. Rakentamiselle vapaata maata on keskustojen läheisyydessä kuitenkin hyvin rajallisesti, minkä takia uuden rakennusmaan luominen vesistötäyttöillä on hyvä keino luoda uutta ja arvokasta rakennuskäyttöön soveltuvaa maata. Vesistötäytöt voivat toimia ratkaisuna myös ylijäämämassojen sijoittamiselle. Tampereella rakennetaan parhaillaan Ranta-Tampellan kaupunginosaa vesistötäytölle Näsijärven rannalle, ja lähitulevaisuudessa myös Hiedanrantaan rakennetaan vesistötäytöille. Helsingissä Jätkäsaaren ja Hernesaaren vesistötäytöille rakennetaan laajoja uusia asuinalueita. Aihe on hyvin ajankohtainen paikallisesti, koko Suomessa ja maailmanlaajuisesti.

Tutkimusaiheenani on vesistötäyttöjen rakentaminen, ja tarkoituksena on tarkastella aihetta yleisestä näkökulmasta ottaen kuitenkin huomioon myös Suomen olosuhteet. Pääkysymyksenäni on, miten vesistötäyttöjen rakentaminen toteutetaan siten, että se täyttää sen käytön asettamat vaatimukset. Kysymykseen liittyy olennaisesti, mitä seikkoja vesistötäyttöjen geoteknisessä suunnittelussa tulee ottaa huomioon. Pohjatutkimuksien toteuttaminen veden alla on haastavaa, painumien pitäminen sallituissa rajoissa on välttämätöntä ja stabiliteetin tulee olla riittävä rakentamisen mahdollistamiseksi. Myös kohteeseen soveltuvien rakentamismenetelmien käyttö on olennaista vesistötäytön lopullisen laadun kannalta. Järviolosuhteet asettavat meriolosuhteisiin verrattuna joitain reunaeh-toja.

Työn toisessa luvussa käsitellään vesistötäyttöjen suunnittelua pohjatutkimusten, painuman ja stabiliteetin sekä täyttömateriaalin osalta ja niissä pyritään keskittymään vesistötäyttöjen rakentamisen kannalta olennaisiin asioihin. Tämän jälkeen käsitellään kolmannessa luvussa rakentamista ja sen menetelmiä ja vaiheita. Käytettävät materiaalit, rakentamismenetelmät ja rakentamisolosuhteet ovat hyvin erilaisia eri puolilla maailmaa. Työssä tarkastellaan aihetta maailmanlaajuisesta näkökulmasta ja tuodaan esille Suomen ominaispiirteitä.

Luvussa neljä tarkastellaan tarkemmin Ranta-Tampellan esimerkkitapausta, mihin liittyen tietoa hankittiin haastatteleamalla kohdetta suunnittelemassa ollutta Juho Mansikka-

mäkeä. Haastattelussa kiinnitettiin huomiota kohteen erityispiirteisiin ja siinä ilmenneisiin ongelmakohtiin. Lisäksi pohditaan myös hyväksi todettuja käytäntöjä ja niiden soveltamista vastaavanlaisissa hankkeissa tulevaisuudessa. Viimeinen luku sisältää yhteenvedon ja tärkeimmät työssä tehdyt johtopäätökset.

2. VESISTÖTÄYTTÖJEN GEOTEKNINEN SUUNNITTELU

2.1 Suunnittelun lähtötietojen hankkiminen

Pohjatutkimuksilla hankitaan tietoa alueen maaperäolosuhteista, jotta suunnittelun rakenteen pohjarakennustyöt voidaan suunnitella ja toteuttaa luotettavasti. Pohjatutkimuksiin kuuluu maakerrosten sijainnin ja laadun selvittäminen, tiiviin pohjakerroksen ja kalliopinnan sijainnin selvittäminen sekä pohjaveden pinnan sijainnin selvittäminen. Pohjatutkimustietoja tarvitaan erilaisten mitoituksien lähtötiedoksi. Suunnittelussa tarkasteltavia asioita voivat olla mm. maanpaine, kantavuus, painuma ja paalujen mitoitus. Lisäksi on selvittävä, onko alueella mahdollisesti pilaantuneita maita ja sedimenttejä. (Jääskeläinen 2011)

Ennen tutkimuksia on oltava tiedossa, mitä alueelle rakennetaan ja mahdollisimman tarkka kuva rakennussuunnitelmista. Nämä tiedot auttavat pohjatutkimusten kohdistamisessa. Alueen maaperästä voi olla jo olemassa olevaa tietoa, jota voidaan hyödyntää uusissa tutkimuksissa. Alueella tai sen läheisyydessä voi myös olla kunnallistekniikkaa tai esimerkiksi kaapeleita, joidenka sijainnista on oltava tietoinen ennen pohjatutkimuksia. Lähtötietojen perusteella laaditaan pohjatutkimuksen ohjelma. (Jääskeläinen 2011)

Vesistötäyttöjen suunnittelussa pohjatutkimuksia joudutaan tekemään vesistön pohjassa olevasta maaperästä. Vesistöillä tutkimuksia voidaan tehdä kahdella tavalla: lautalta tai jäältä. Lautalta tehdyt tutkimukset tuovat selvästi lisähintaa verrattuna jäältä tehtyihin, mutta toisaalta tulevan talven jäätilanteesta ei voida olla koskaan varmoja. Mikäli maaperä on pehmeää savea, voidaan tutkimuksia, kuten painokairauksia ja näytteenottoa tehdä jäältä myös käsin ilman raskasta kairavaunua. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

2.2 Täyttömateriaalit

2.2.1 Louhe

Louhe on laadukas ja kuormitusta hyvin kestävä, vesistötäyttöjen rakentamiseen hyvin soveltuva materiaali. Sen ongelmana on kuitenkin pohjarakenteiden, kuten anturoiden ja kellaritilojen, rakentamisen sekä paalutuksen haasteellisuus. (Bo & Choa 2009) Lou-

hetäyttö kuitenkin voi soveltua huolella tehtynä maanvaraisten perustusten rakentamiselle, joten paaluja ei välttämättä tarvita (Häkkänen 2014). Louhetäyttöä voidaan tiivistää dynaamisilla tiivistysmenetelmillä (Bo & Choa 2009). Suomessa vesistötäyttöjä rakennetaan usein kalliorakennustöistä saatavalla louheella, mikä toimii samalla ratkaisuna myös louheen sijoittamiselle.

2.2.2 Hiekka

Bon & Choan (2009) mukaan hiekka on paras materiaali vesistötäyttöjen rakentamiseen. Hiekan hyviä ominaisuuksia ovat helppo käsittely, hyvä vedenläpäisevyys, hydraulisen täytön mahdollisuus, hyvä kantokestävyys, tiivistystyön helppous ja se, että painumat eivät ole pitkäaikaisia. Karkea hiekka on rakennusominaisuuksiltaan parasta, mutta sen pumppaus hydraulisessa täytössä on kalliimpaa, koska karkea materiaali kuluttaa pumpputkeaa hienompaa hiekkaa enemmän. Käytettävän hiekan ei tulisi sisältää yli 10% soveltumattomia materiaaleja, kuten savea tai turvetta. Hiekkaa voidaan ottaa joko maalla olevasta lähteestä kaivamalla ja kuljettamalla kohteeseen kuorma-autoilla tai kuljetushihnalla. Hiekkaa voidaan myös ruopata vesistön pohjasta ja kuljettaa kohteeseen esimerkiksi proomulla. (Bo & Choa 2009)

2.2.3 Muut karkearakeiset materiaalit

Karkearakeisilla materiaaleilla on yleisesti ottaen hyvä kuormituskestävyys, ja ne soveltuvat hyvin vesistötäyttöjen materiaaleiksi. Haittapuolena niillä on kuitenkin mm. hydraulisen täytön vaikeus. (Bo & Choa 2009)

2.2.4 Savi

Savi soveltuu heikosti vesistötäyttöjen materiaaliksi johtuen sen huonosta vedenläpäisevyydestä, huonosta kuormituskestävyydestä, aikaa vievästä tiivistymisestä, huonosta käsiteltävyydestä (Bo & Choa 2009) ja työkoneiden mahdollisesta uppoamisesta tai juuttumisesta tuoreeseen savikerrokseen (Chu & Guo 2016). Savea ja muita pehmeitä materiaaleja joudutaan käyttämään, koska laadukkaita rakeisia materiaaleja voi olla heikosti saatavilla ja tarve uudelle rakennusmaalle on merkittävä. Myös entistä syvemmät täyttökohteet vaativat enemmän täyttömateriaaleja. (Chu & Guo 2016) Savea on saatavilla hyvin ympäri maailman ja sitä voidaan ottaa joko maalta kaivamalla tai ruoppaamalla vesistön pohjasta (Bo & Choa 2009).

Pehmeitä maita voidaan saada rakennuskelpoiseksi erilaisilla esirakentamismenetelmillä. Suosituin menetelmä vesistötäyttöjen rakentamisessa on ylipenkereen ja pystyjoituksen käyttö. Muita mahdollisia menetelmiä ovat vakuumikonsolidaatio, syvästabilointi, geotuubit ja kiviainespilarit. (Chu & Guo 2016) Suomen olosuhteissa savea ja muita pehmeitä materiaaleja voidaan käyttää massastabiloituna reunapenkereen sisällä (Forsman et al 2014)

2.2.5 Muut mahdolliset materiaalit

Viemäri- ja muun jätteen käyttöä vesistötäyttöjen rakentamisessa on myös selvitetty. Syynä tälle on hyvin täyttöön soveltuvien materiaalien riittämättömyys, täyttöjen yhä suuremmat syvyydet ja siitä johtuvat suuremmat materiaalarpeet, sekä jätteen sijoittamisen ongelma tilan puutteen takia. Viemärijätettä voidaan mahdollisesti käyttää sekoittamalla sitä sementtiin ja joko kuparikuonaan tai merisaveen. Seoksella on pelkkään saveen nähden hyvät geotekniset ominaisuudet ja se voidaan pumpata suoraan täyttökohteeseen. Menetelmä ei kuitenkaan sovellu suuriin täyttökohteisiin, ja sen keskeisenä tarkoituksena onkin saada jätemateriaalia hyötykäyttöön. (Chu & Guo 2016) Chun & Guon (2016) tutkimusraportissa ei kuitenkaan oteta kantaa mahdollisiin ympäristöhaittoihin, jotka ovat jätemateriaalien rakennuskäyttöön soveltuvuudessa tärkeitä kriteerejä.

2.3 Geotekninen mitoitus

Geoteknisellä kantavuudella tarkoitetaan sitä pohjapainetta, jolla varmuus maan murtumista vastaan on riittävä ja jonka aiheuttamat painumat ovat riittävän pieniä. Tarkastelun kohteena tulee siis aina olla sekä maan murtuminen että painuminen. Murtorajatilatarkastelussa varmistetaan riittävä varmuus murtumista vastaan, ja käyttörajatilatarkastelussa varmistetaan, että käytön aikaiset painumat ja painumaerot ovat sallittujen rajojen sisällä. (Rantamäki et al 2009)

Sekä stabiliteetti- että painumatarkasteluissa keskeisinä ilmiöinä ovat maassa olevat jännitykset sekä huokosvedenpaine. Raepaineella, eli tehokkaalla jännityksellä tarkoitetaan painetta, joka välittyy maarakeiden pinnoilta toisille niiden kosketuskohdissa. Tehokas jännitys ilmaistaan keskimääräisenä poikkileikkauksella olevana paineena, vaikka kosketuskohdissa olevat paineet ovat sitä huomattavasti suurempia. Huokosvedenpaineella tarkoitetaan sitä vedenpainetta, joka vaikuttaa tietyssä kohdassa joka suuntaan saman suuruisena. Maa ottaa sille aiheutetun kuormituksen vastaan raepaineena ja huokosvedenpaineena. Tätä ilmiötä voidaan kuvata kaavalla 1

$$\sigma = \sigma' + u, \quad (1)$$

missä σ on kokonaisjännitys maassa, σ' on tehokas jännitys ja u on huokosvedenpaine. (Rantamäki et al 2009) Mitoituksessa kriittisenä tekijänä on useimmiten tehokas jännitys, joka saadaan vähentämällä huokosvedenpaineen arvo kokonaisjännityksestä.

2.4 Stabiliateetti

Stabiliateettitarkasteluun on olemassa kaksi eri menetelmää, liukupinta-analyysi ja murtotilaan perustuvat kantavuuskaavat. Murtotilaan perustuvien kantavuuskaavojen käyttö edellyttää tasalaatuisia maaperäolosuhteita ja se soveltuu erityisesti esimerkiksi anturaperustuksen geoteknisen kantavuuden laskemiseen. Liukupinta-analyysin soveltaminen vaatii tarkahkoa tietoa maakerroksista ja niiden paksuuksista. Sitä voidaan pitää yleis-pätevänä menetelmänä, jota voidaan soveltaa myös monimutkaisissa tapauksissa. Maarakeinteiden stabiliateetin tarkasteluihin käytetään liukupinta-analyysia. (Rantamäki et al 2009) Vesistöäytöjen suunnittelussa liukupinta-analyysi on hyvin soveltuva menetelmä, joten sitä käsitellään tässä työssä tarkemmin.

2.4.1 Leikkauslujuus

Maan keskeisenä ominaisuutena stabiliateettitarkastelussa on sen leikkauslujuus, jota voidaan kuvata kaavalla 2.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

Kaavassa τ_f on maan leikkauslujuus, c koheesio, σ leikkauspinnassa vaikuttava normaali-jännitys ja φ maan sisäinen kitkakulma. (Rantamäki et al 2009)

Koheesio johtuu maahiukkasten välisistä kiinnevoimista. Lisäksi koheesioon vaikuttaa sähköstaattiset voimat, jotka vaikuttavat mineraalihiukkasten ja niitä ympäröivien vesivaippojen välillä. Sisäinen kitka johtuu rakeiden välisistä hankauksista. Sen suuruuteen vaikuttaa kitkakerroin, joka koostuu kitkakulman tangentista ja leikkauspinnassa vaikuttavasta normaalijännityksestä. Kitkamaalajin kitkakulmaan vaikuttaa sen rakeiden muoto, raekokojakauma ja tiiviys. (Rantamäki et al 2009)

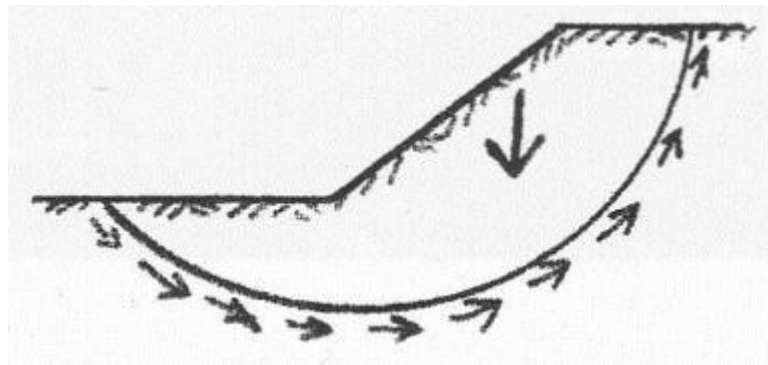
Maalajit voidaan niiden leikkauslujuuden muodostumistavan mukaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: koheesiomaihin, kitkamaihin ja välimuotomaihin. Koheesiomailla, kuten savella ja liejulla, leikkauslujuus koostuu täysin koheesiosta, eli niiden kitkakulma oletetaan nolaksi. Kitkamaalajeilla, kuten hiekalla ja louheella, koheesio oletetaan nolaksi ja niiden leikkauslujuus muodostuu kokonaan sisäisestä kitkasta. Useita maalajeja tulee tar-

kastella välimuotomaalajeina, joissa leikkauslujuus koostuu sekä koheesiosta että kitkasta. Kummankin laskeminen mukaan leikkauslujuuteen tuottaa kuitenkin helposti liian suuria lujuuden arvoja, joten mitoituksessa huomioidaan usein niistä kahdesta hallitsemampi tekijä. Leikkauslujuuteen vaikuttaa koheesion ja sisäisen kitkan lisäksi myös kuormitusnopeus, kuormitettavan maan vedenläpäisevyys ja vesipitoisuus. (Rantamäki et al 2009)

Kaavaa 2 täytyy korjata vastaamaan paremmin todellisuutta ottamalla huomioon murtopinnassa vaikuttava tehokas normaalijännitys σ' , jolloin saadaan huomioitua huokosvedenpaineen rakeiden välisiä jännityksiä pienentävä vaikutus. Samalla myös koheesio ja kitkakulma tulee muuttua tehokkaiksi lujuusparametreiksi. Leikkauslujuus määritetään siis samalla kaavalla, jossa ainoastaan yhtälön oikean puolen parametrit on muutettu tehokkaiksi. (Rantamäki et al 2009)

2.4.2 Liukupinta-analyysi

Maan murtuu liukupintaa pitkin, joka kuvan 1 yksinkertaistetussa tapauksessa on ympyrän kaaren muotoinen.



Kuva 1. Maan murtuminen liukupintaa pitkin (Jääskeläinen 2011)

Liukupinnan yläpuoleisen maan paino aiheuttaa aktiivimomentin liukupinnan pyörähdyskeskipisteen suhteen. Lisäksi aktiivimomenttiin kuuluvat muut vaikuttavat kuormat, kuten esimerkiksi talon perustukset. Passiivimomentti muodostuu liukupinnan suuntaisten leikkausjännitysten aiheuttamista leikkausvoimista, jotka pyrkivät estämään maan murtumisen. Maan varmuus murtumista vastaan on passiivimomentin ja aktiivimomentin suhde, jota voidaan kuvata kaavalla

$$F = \frac{M_p}{M_a}, \quad (3)$$

missä F on varmuuskerroin, M_p passiivimomentti ja M_a aktiivimomentti. Useimmissa tapauksissa vaarallisin liukupinta ei ole tiedossa, vaan laskelmat on suoritettava useilla eri liukupinnoilla pienimmän varmuuden tai murtokuorman löytämiseksi. Laskelmat tämän

liukupinnan löytämiseksi tehdään käytännön suunnittelussa tietokoneella. Vaarallisin liukupinta on yleensä sellainen, joka kulkee mahdollisimman pitkän matkan pehmeissä maakerroksissa ja lyhyen matkan kovissa kerroksissa. (Rantamäki et al 2009)

Työssä käydään yksinkertaisuuden vuoksi liukupinta-analyysi tarkemmin läpi ainoastaan koheesiomaan tapauksessa, mutta myös kitkamaiden ja välimuotomaiden liukupinta-analyysi ja niihin liittyvät erityispiirteet käydään lyhyesti läpi.

Koheesiomaissa leikkauslujuus muodostuu ainoastaan koheesiosta, joka voi muuttua maakerroksesta toiseen. Passiivimomentin laskennassa tämä otetaan huomioon laske-
malla jokaisen maakerroksen aiheuttama passiivimomentti erikseen kaavalla

$$M_p = R \cdot \Sigma s \cdot \Delta l, \quad (4)$$

missä R ympyränkaaren muotoisen liukupinnan etäisyys pyörähdyskeskipisteestä ja $\Sigma s \cdot \Delta l$ termi, jossa on laskettu maakerrosten leikkauslujuuksien (s) ja niitä vastaavien leikkauspintojen pituuksien (Δl) summien tulo. (Rantamäki et al 2009)

Aktiivimomentin laskemista varten voi olla hyödyllistä jakaa liukupinnan sisällä oleva alue pystysuoriin lamelleihin. Aktiivimomentti muodostuu siten, että lasketaan ensin jokaisen lamellin oma paino ja kohtisuora etäisyys lamellin keskilinjasta pyörähdyskeskipisteeseen. Mikäli lamelli sijaitsee pyörähdyskeskipisteen sortumista vastustavalla puolella, lasketaan sen etäisyys negatiivisena. Lisäksi lasketaan ulkoisten kuormien aiheuttama momentti. Aktiivimomentti M_a lasketaan kaavalla

$$M_a = Q \cdot a + \Sigma W \cdot x, \quad (5)$$

missä Q on ulkoinen kuorma ja a sen kuorman momenttivarsi. W on lamellin paino ja x lamellin momenttivarsi pyörähdyskeskipisteen suhteen. (Rantamäki et al 2009)

Kitkamailla liukupinta-analyysi toimii periaatteeltaan samanlaisella tavalla. Niissä leikkauslujuus on kuitenkin riippuvainen kitkasta, joka riippuu samassa pisteessä vaikuttavasta normaalivoimasta. Normaalivoiman suuruuteen vaikuttaa maan oman painon lisäksi ulkoinen kuorma, joten murtokuormaa laskeessa joudutaan kokeilemalla etsimään sille yhtälön toteuttava arvo. Aktiivimomentti lasketaan kitkamailla vastaavalla tavalla kuin koheesiomaillakin. Välimuotomaassa vaikuttaa sekä kitka että koheesio ja välimuotomaan liukupinta-analyysillä on mahdollista huomioida myös huokosvedenpaine, mikä on esimerkiksi padoissa ja vesistötäydyksissä tärkeää. Välimuotomaan tapauksessa varmuuden ratkaisu on hieman haastavampaa. Laskettava varmuus on yhtälön molemmilla puolilla, mistä johtuen laskeminen vaatii iterointia. Perusperiaatteeltaan myös tämä on kuitenkin samanlainen menetelmä, jossa määritetään passiivi- ja aktiivimomentit, ja varmuus saadaan niiden suhteena. (Rantamäki et al 2009)

2.5 Painuma

Maakerrosten painumalajeja on neljää erilaista, ja niiden yhteisvaikutusta voidaan kuvata kaavalla

$$S = S_i + S_k + S_t + S_s, \quad (6)$$

missä S on kokonais-, S_i alku-, S_k konsolidaatio-, S_t sivusiirtymien aiheuttama ja S_s jälkipainuma (Rantamäki et al 2009).

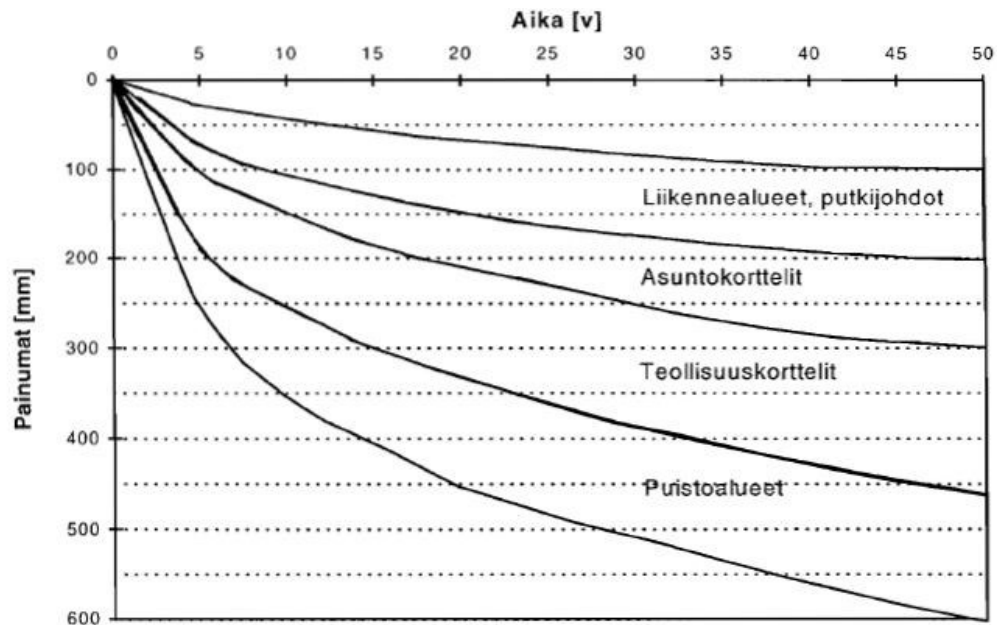
Alkupainuma on usein jo rakennusaikana suhteellisen nopeasti tapahtuva painumalaji, joka johtuu kuormituksen aiheuttamista leikkausmuodonmuutoksista (Rantamäki et al 2009). Koheesiomailla tilavuus ja vesipitoisuus eivät juurikaan muutu alkupainuman aikana. Niiden alkupainumaan sisältyy leikkausmuodonmuutoksia ja myös hieman rakeiden liukumista toistensa suhteen. Kitkamailla maakerrostuman tilavuus muuttuu alkupainuman aikana. Niillä muodonmuutokset johtuvat rakeiden uudelleenjärjestymisestä sekä ilman ja veden poistumisesta rasituksen alla. Kitkamailla konsolidaatio- ja alkupainumat tapahtuvat samanaikaisesti ja mitoituksessa niiden painumat lasketaan kokonaan vain toisena painumalajina. (Jääskeläinen 2011)

Konsolidaatiopainuma on huokostilavuuden ja vesipitoisuuden pienenemisen aiheuttaman tiivistymisen seurauksena tapahtuvaa maakerroksen tilavuuden pienenemistä. Hienorakeiset maat ovat usein veden kyllästämiä ja konsolidaatiopainuman muodostumiseksi liiallisen huokosveden on väistyttävä. Hienorakeista maata kuormittaessa maa ottaa kuorman aiheuttaman jännityslisäyksen vastaan huokosveden ylipaineen kasvamisella. Tämä ylipaine pyrkii purkautumaan ajan kuluessa ja samalla kuormituksen aiheuttama paine siirtyy raepaineeksi. Hienorakeisilla maalajeilla vedenläpäisevyys on usein huono, minkä seurauksena veden poistuminen on hidasta ja niin myös konsolidaatiopainuma tapahtuu hitaasti. Karkearakeisilla mailla vedenläpäisevyys on niin suuri, että vesi poistuu käytännössä heti kuormituksen tapahduttua. Tämän takia konsolidaatiopainumaa ei voida erottaa alkupainumasta. (Rantamäki et al 2009)

Sivusiirtymien aiheuttama painuma johtuu plastisista muodonmuutoksista, jotka tapahtuvat maan jännitystilan lähentyessä murtotilaa. Tämä painumalaji voi tulla kyseeseen, jos varmuus murtumista vastaan on pieni. Jälkipainumalla tarkoitetaan konsolidaatiopainuman loppuvaiheissa tapahtuvaa painumaa, jonka suuruus on kuitenkin usein vähäinen verrattuna konsolidaatiopainumaan. (Rantamäki et al 2009) Jälkipainumaa on pyritty selittämään atomi- ja elektronitasolla tapahtuvilla siirtymillä. Se voi olla merkittävä painumalaji esimerkiksi turpeilla, mutta kivennäismaalajeilla sitä ei tarvitse ottaa huomioon. (Jääskeläinen 2011) Vesistöäytöjen rakentamisessa keskeisimmät painumamuodot

ovat mahdollisesti hienorakeisen maan konsolidaatiopainuma sekä kitkamaasta tehdyn täytön alku- ja konsolidaatiopainumat.

Kuvassa 2 on esitetty eri käyttötarkoituksille suuntaa-antavat painumarajat, joiden ylityessä suositellaan käytettäväksi esirakennustoimenpiteitä.



Kuva 2: Suuntaa antavat painumarajat eri käyttötarkoituksilla (Nauska & Havukainen 1998)

Esirakentamisella tarkoitetaan rakentamiselle huonosti kelpaavan maan, kuten pehmeikön parantamista rakennuskelpoiseksi (Nauska & Havukainen 1998).

2.6 Eroosiosuojaus

Veden aiheuttama eroosio kuluttaa paljasta rantaviivaa, minkä takia vesistöitäytöjen rantaan tulisi rakentaa eroosiosuojarakenne. Eroosiosuoja voi estää myös pohjaveden virtauksen aiheuttaman materiaalin huuhtoutumisen vesistöön. Kiviheitoketta voidaan käyttää eroosiosuojauksena loivana luiskana matalahkoissa kohteissa, joissa eroosiovoimat eivät ole hyvin merkittäviä. Nykyään suojauskerros rakennetaan geotekstiilin päälle, koska niin voidaan käyttää pienempää kerrospaksuutta. Kivien optimaalinen raekoko riippuu eroosiovoimien suuruudesta. (Bo & Choa 2009) Louheesta voidaan rakentaa myös järjestelemällä kuvan 3 mukainen eroosiosuojaus.



Kuva 3: Louheesta rakennettu eroosiosuojaus (Helsingin kaupunkitilaohje 2016)

Tämänkaltainen rakenne sopii syviin kohteisiin, joissa aallokko ja virtaukset aiheuttavat merkittäviä rasituksia (Bo & Choa 2009).

Kauempana rannasta voidaan käyttää erilaisia aallonmurtajia vähentämään aallokon aiheuttamaa rasitusta. Pystysuoria seinämiä voidaan käyttää kohteissa, joissa tilaa on vähän tai esimerkiksi satamarakenteissa, joissa ne ovat välttämättömiä, koska laivojen on päästävä aivan rantaan kiinni. Rannan eroosiosuojaus voidaan myös toteuttaa yhdistelemällä edellä mainittuja menetelmiä. (Bo & Choa 2009)

3. TÄYTÖN RAKENNUSVAIHEET

3.1 Ruoppaus

Ruoppaus on työmenetelmä, jossa veden alaista maa-ainesta kaivetaan, siirretään ja läjitetään. Ruoppaamiseen käytetään yleensä siihen erityisesti suunniteltua kalustoa, eli ruoppaajaa ja sen tarvitsemaa apukalustoa. Ruopata voidaan myös rannalta käsin tai joissain tapauksessa myös matalassa vesistössä kuivalle maalle tarkoitetulla kalustolla. Ruoppausta käytetään paljon vesiväylien kunnossapitoon, vesistöjen säännöstelyyn ja tilan parantamiseen, vedenalaisten rakenteiden rakentamiseen sekä vähemmän myös maa-aineksenottoon ja teollisuusjätteiden käsittelyyn. (Hartikainen 2007) Vesistötäyttäjien rakentamista varten voidaan joutua ruoppaamaan, jos vesistön pohjassa olevat maa-peräolosuhteet eivät ole suotuisia täytön rakentamiselle, eli on tarve massanvaihdon. Ruoppaamalla voidaan myös hankkia materiaalia vesistötäyttöön.

Ruoppaajia on kahta eri päätyyppiä, kauharuoppaajia ja imuruoppaajia. Kauharuoppaajat voidaan jakaa vielä pisto-, kuokka-, kahmari- ja ketjukauharuoppaajiin. Pistoruoppaajat ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia kuin pistokaivinkoneet. Kaivaessa kauha liikkuu jäykän puomin varassa eteenpäin, minkä jälkeen täysi kauhallinen käännetään sivulle ja kipataan proomuun avaamalla kauhan pohjaluukku. Pistoruoppaajaa liikutellaan ruoppaajan perässä olevan pohjaan ulottuvan paalun ja kauhan avulla. Kaivun aikana ruoppaaja pysyy paikallaan kahden sen etuosassa olevan kaivupaalun varassa. Kuokkaruoppaajat ovat rakenteeltaan pistoruoppaajien kanssa saman tyyppisiä, mutta pistokauhan sijasta niissä varsinaisena ruoppauskoneena on hydraulinen kuokkakauha, jolla voi kaivaa noin 2–20 metrin syvyyteen. Kahmariruoppaajat kaivavat maata ketjun varassa roikkuvalla kauhalla. Niiden etuna on mahdollisuus kaivaa syvälle ja työskennellä ahtaissakin kohteissa. Ketjukauharuoppaajat kaivavat maata jäykkään noin 45 asteen kulmassa olevaan puomiin kiinnitetyn kauhakuljettimen avulla. Kauhat tyhjennetään ruoppaajassa olevaan suppiloon, josta maa siirretään proomuun. (Hartikainen 2007) Kuokkakauharuoppaaja on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: Kuokkakauharuoppaaja (Jan De Nul Group)

Imuruoppaajat irrottavat maata neljällä eri tavalla. Pohjaimurit irrottavat maata ainoastaan keskipakopumpun tekemän alipaineen ja sen aiheuttaman imuvoiman avulla. Leikkuri-imurit irrottavat maata pyörivillä ja samalla leikkaavilla terillä. Kauhapyöräimurit irrottavat maata kauhoja sisältävällä isolla pyörällä ja niiden ero leikkuri-imureihin on työtekniikan osalta pieni. Suihkuimurit irrottavat maata voimakkaalla vesisuihkulla, mutta tämä on harvinainen ja tehoton menetelmä. Kaikissa imuruoppaajissa yhteistä on se, että irrotettua maa-aineksen ja veden seosta pumpataan putkea ylöspäin ja irrotettu massa johdetaan joko kuljetusproomuihin tai -kouruihin. Irrotettu massa voidaan johtaa myös suoraan läjityskohteeseen paineputkien avulla, mikä on nykyään eniten käytetty menetelmä. (Hartikainen 2007)

3.2 Massanvaihto päätypengerryksellä

Päätypengerryys on ruoppauksen ohella toinen vaihtoehtoinen massanvaihtotapa vesistöalueilla. Ruoppaukseen verrattuna sen etuna on se, että ruoppaajia ja niiden tarvitsemaa apukalustoa ei tarvita. Niissä tapauksissa, joissa pohjamaa ei ole riittävän pehmeää, päätypengerryys ei onnistu ilman lisätoimenpiteitä, joilla tehostetaan penkereen painumista (Hartikainen 2007).

Massanvaihto tehdään päätypengertämällä siten, että pengertä aletaan rakentaa jyrkkäreunaisena, kiilamaisena ja ylikorkeana penkereenä. Ylikorkean penkereen tarkoituksena on kuormittaa alla olevat pehmeät maakerrokset murtoon ja sen jälkeen työntää

irronneet maat penkereen sivuille. Pohjamaan murtumisen varmuuden tulee siis olla selvästi alle yhden, jotta haluttu vaikutus saadaan aikaan. Irronnutta maata tulisi pyrkiä siirtämään alapuolisen kantavan maan kaltevuuden suuntaan. Pohjamaa nousee penkereen edetessä sen sivuilta, ja nämä maat haittaavat penkereen painumista. Kohonneet maat tulee poistaa niiden ylitettyä tietyn korkeuden. (Hartikainen 2007)

Päätypengerryksen vaikutusta voidaan tehostaa räjäyttämällä pohjamaata ja siten pehmentää maata, joka nousee helpommin ylös penkereen painon alla. Myös penkereen alle jäänyttä maata voidaan heikentää räjäyttämällä, jos pelkkä penkereen oma paino ei pysty syrjäyttämään sitä. Penkereen omaa painoa voidaan kasvattaa rakentamalla lopullista pengertä korkeampi ylipenger. Ylipenger rakennetaan yleensä noin 1,5–2,5 m lopullista tasoa korkeammaksi ja vähintään 10 m pitkäksi. Samaa ylipengertä voidaan käyttää myös penkereen painumien nopeuttamiseen. Usein edellä mainittuja keinoja yhdistelemällä penger saadaan painumaan ja pehmeät maakerrokset saadaan nousemaan halutulla tavalla. (Hartikainen 2007)

3.3 Käytetyt rakentamismenetelmät

3.3.1 Täytön rakentaminen maalta

Täyttö voidaan rakentaa maalta kuivamenetelmällä, jos käytetyt materiaalit kuljetetaan paikalle maateitse. Täytön rakentaminen etenee rantaviivasta kohti haluttua tasaa. Tyyppillisiä menetelmässä käytettäviä materiaaleja ovat mm. louhe, hiekka ja sora. Menetelmä toimii hyvin, kun vesistön pohja on riittävän kestävä. Jos pohja koostuu pehmeästä materiaalista, täyttömateriaali voi syrjäyttää pohjamaata, mikä taas johtaa suurempaan materiaalitarpeeseen. (Bo & Choa 2009) Työmenetelmä on vastaava kuin massanvaihdossa päätypengerryksellä, mutta pengertä ei tarvitse rakentaa ylikorkeana.

3.3.2 Maan kuljetus pohjaluukkuproomulla

Tämä menetelmää voidaan käyttää ruopatuille materiaaleille, kuten erilaisille rakeisille materiaaleille ja jopa saville. Maamateriaalia lastataan proomuun, joka siirtyy kohteeseen ja pudottaa materiaalin paikalleen pohjaluukkujen kautta. Pohjaluukkuproomumenetelmää voidaan käyttää syvissäkin kohteissa, joissa pohjamaa voi olla myös pehmeää. Viimeiset 2–3 metriä täytyy täyttää jollakin muulla menetelmällä. (Bo & Choa 2009)

3.3.3 Hydraulinen täyttö

Hydraulisessa täytössä hopperiruooppaaja täyttää ruumansa täyttömateriaalilla joko välivarastointikasasta tai suoraan ruoppaamalla, ja sitten siirtyy täyttökohteen viereen, missä materiaali pumpataan putkea pitkin haluttuun kohtaan. Kohteessa materiaalia voidaan siirtää esimerkiksi puskutraktorilla tarkemmin oikeaan kohtaan. Pumpattava materiaali on rakeisen materiaalin ja veden sekoitusta. Menetelmä soveltuu huonosti hyvin mataliin kohteisiin tai liian pehmeille pohjaolosuhteille. (Bo & Choa 2009)

3.3.4 Hiekan levitys

Menetelmässä käytetty levitin on päästään suljettu putki, jossa on pieniä reikiä. Hiekan ja veden seosta pumpataan välivarastointikasasta proomussa olevan levittimen kautta. Hiekka levittyy tasaisesti alueelle putkessa olevista rei'istä. Levitintä liikutellaan työn aikana esimerkiksi puskutraktorilla. Menetelmä soveltuu hyvin, jos täyttökohde on matalahko. Se toimii hyvin myös tilanteissa, joissa maaperä on pehmeää. (Bo & Choa 2009)

3.3.5 Rantasuojauksen sisään täyttäminen

Joissain tapauksissa rakennettavaa täyttöä voidaan haluta suojata aallokon kuluttavalta vaikutukselta, joka aiheuttaa materiaalin hävikkiä. Näissä tapauksissa voi olla järkevää rakentaa ensin suojavalli maamateriaalista täytön tulevan ulkoreunan tasaan. Suojavalliin tulee jättää aukko, jotta sen takana oleva vesi pääsee poistumaan. (Bo & Choa 2009) Tätä menetelmää voidaan soveltaa myös siten, että sisäpuolinen täyttö rakennetaan heikkommasta materiaalista kuin itse suojavalli.

3.4 Tiivistys

Täyttötöyön jälkeen maa on vielä löyhässä tilassa. Tiivistämisellä voidaan parantaa sen monia ominaisuuksia, kuten kantavuutta ja leikkauslujuutta ja vähentää käytön aikana syntyviä muodonmuutoksia (Hartikainen 2007).

3.4.1 Tiiviysaste

Maarakenteen tiiviyyttä voidaan arvioida tiiviysasteella, joka tarkoittaa maan kuivairtiheyden suhdetta kyseisen maamateriaalin maksimi-irtotiheyteen. Tiiviysastetta esitetään kaavalla

$$tiiviysaste = 100 \% \cdot \frac{\rho}{\rho_{max}}, \quad (7)$$

missä ρ on maarakenteen kuivairtitiheys, ja ρ_{max} on maalajin maksimi-irtitiheys. Tiivistystyön tarkoituksena on saada maan irtotiheyttä lähemmäksi maksimia, mikä myös tarkoittaa sen huokoisuuden vähentämistä. Maan huolellisella tiivistämisellä ennen rakentamista voidaan välttää rakenteen käytön aikaisten haitallisten muodonmuutosten syntyminen. Tiivis maa on ominaisuuksiltaan löyhää maata kantavampaa, leikkauslujuudeltaan parempaa, vähemmän vettä läpäisevää ja paremmin sään vaihtelua kestävä. (Hartikainen 2007)

Tasarakeiset maalajit tiivistyvät vähemmällä työllä, mutta tiiviysaste jää sekarakeista pienemmäksi. Karkea- ja tasarakeiseen kitkamaahan voidaan lisätä hienompaa ainesta parantamaan saavutettavaa tiiviysastetta. Raemuodoltaan parhaiten tiivistyviä maalajeja ovat pyöreä- ja kuutiorakeiset maat ja heikoimpia ovat litteärakeiset. Tiivistystyön seurauksena lujuudeltaan heikon maalajin kivipartikkelit voivat murtua ja pyöristyä, mikä johtaa maan ominaisuuksien huonontumiseen. (Hartikainen 2007)

3.4.2 Tiivistystyö

Tiivistysmenetelmiä on kahta eri päätyyppiä: staattisia, joissa tiivistävä vaikutus tapahtuu staattisella painolla, ja dynaamisia, joissa tiivistys tapahtuu iskujen tai värähtelyn avulla. Staattisessa tiivistyksessä käytetään yleensä erilaisia jyriä, kuten sileävalssi-, kumipyörä ja sorkkajyriä. (Hartikainen 2007) Ylikuormitus voidaan myös laskea staattiseksi tiivistysmenetelmäksi, mutta sen vaikutus on louheen ja luonnon kitkamaiden tiivistämiseen melko heikko. Ylikuormitus sopii parhaiten koheesiomaiden tiivistämiseen. (Havukainen 2013)

Syvätiivistyksellä tarkoitetaan tiivistysmenetelmiä, joilla voidaan tiivistää yli metrin paksuisia maakerroksia. Dynaamisia syvätiivistysmenetelmiä ovat pudotustiivistys, RIC (Rapid impact compaction) eli nopeaiskustiivistys ja vibrotiivistys. Pudotustiivistyksellä voidaan tiivistää jopa yli 10 metrin paksuisia maakerroksia ja se soveltuu erityisesti karkeille maalajeille, kuten hiekalle, soralle ja vesistötäytöissä käytetylle louheelle. Karkeille maalajeille se soveltuu hyvin siksi, että niissä huokosveden ylipaine tasaantuu hyvin nopeasti. Hienorakeisilla mailla pudotustiivistystä voidaan myös käyttää, mutta siinä tapauksessa on huolehdittava huokosveden paineen tasaantumisesta pudotusten välissä. Paineen tasaantumista voidaan tehostaa käyttämällä pystyjoitusta. (Havukainen 2013)

Pudotustiivistyksessä noin 10–25 tonnin painoista ja halkaisijaltaan 1,5–2,5 m järkälettä pudotetaan maahan yleensä 10–20 m korkeudelta. Järkäle on kiinnitettynä vaijerilla nosturiin, jolloin se voidaan välittömästi nostaa uudestaan pudotuksen jälkeen. (Havukainen 2013) Pudotustiivistyksessä käytettävä laitteisto on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Pudotustiivistyksessä käytettävä kalusto (Mansikkamäki)

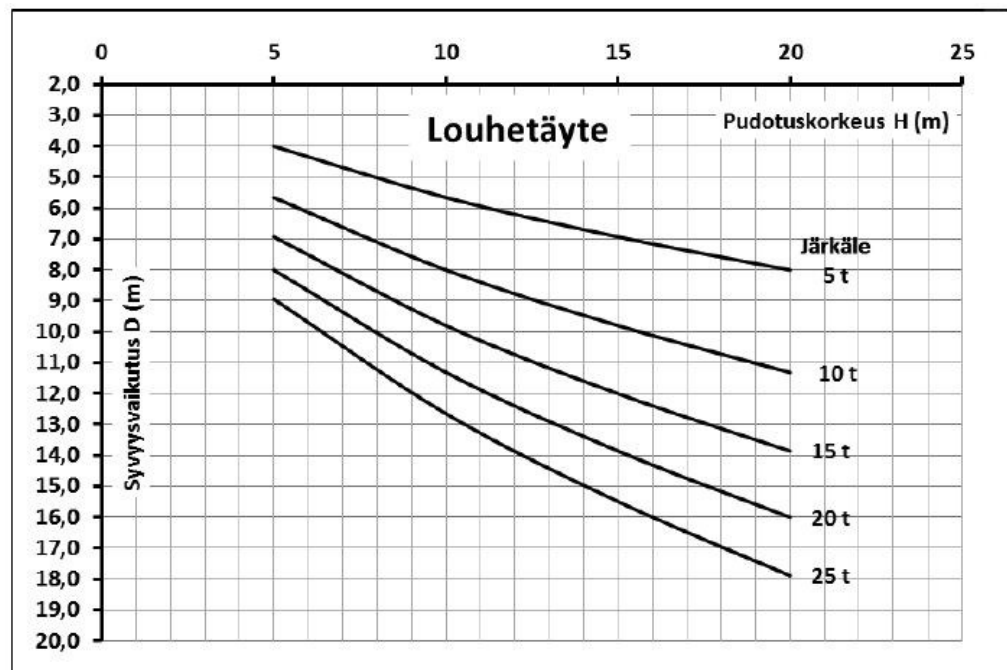
Pudotustiivistystyö vaatii toimiakseen 0,3–1,0 m murskeesta tehdyn iskuarinan, joka tiivistetään ennen varsinaista pudotustiivistystä. Tiivistettäessä louhetäyttöä tulee sen pinta kiilata louhetta hienommalla murskeella tai pienlouheella. Pudotukset suunnitellaan etukäteen neliöruudukkoon, jonka yhden sivun pituus on 2,5–5 m. Järkäle pudotetaan jokaisella kierroksella vähintään kaksi kertaa samaan pisteeseen, ja yhteensä kierroksia on 2–6. Joka toisella kierroksella järkäle pudotetaan neliöruudukon nurkkiin ja joka toisella ruutujen keskelle. Järkäleen kallistumista voidaan pyrkiä ehkäisemään pudottamalla se ensiksi joka toiseen pisteeseen ja sen jälkeen niiden väleihin. Jokaisen täyden kierroksen jälkeen iskujen aiheuttamat kraatterit täytetään ja iskuarina tiivistetään uudelleen. Tiivistyminen on riittävää, kun kahden viimeisen pudotuksen aiheuttama painuma on yhteensä alle ennalta määritetyn raja-arvon. Lopuksi pinta vielä tasataan ja tiivistetään esimerkiksi täryjyrällä. Jos maakerros on yli 10 m paksu, voidaan käyttää kaksivaiheista pudotustiivistystä. Ensimmäisellä kierroksella käytetään harvempaa ruudukkoa sekä suurempaa järkälettä ja pudotuskorkeutta, jotta syvyysvaikutus saadaan suuremmaksi. Kovat iskut kuitenkin aiheuttavat pintakerrosten löyhtymistä, joten ne tiivistetään toisella kierroksella. Silloin käytetään tiheämpää ruudukkoa, sekä pienempää pudotuskorkeutta ja järkälettä. (Havukainen 2013)

Pudotustiivistyksen syvyysvaikutusta voidaan arvioida Lukasin kaavalla

$$D_{max} = k\sqrt{WH}, \quad (8)$$

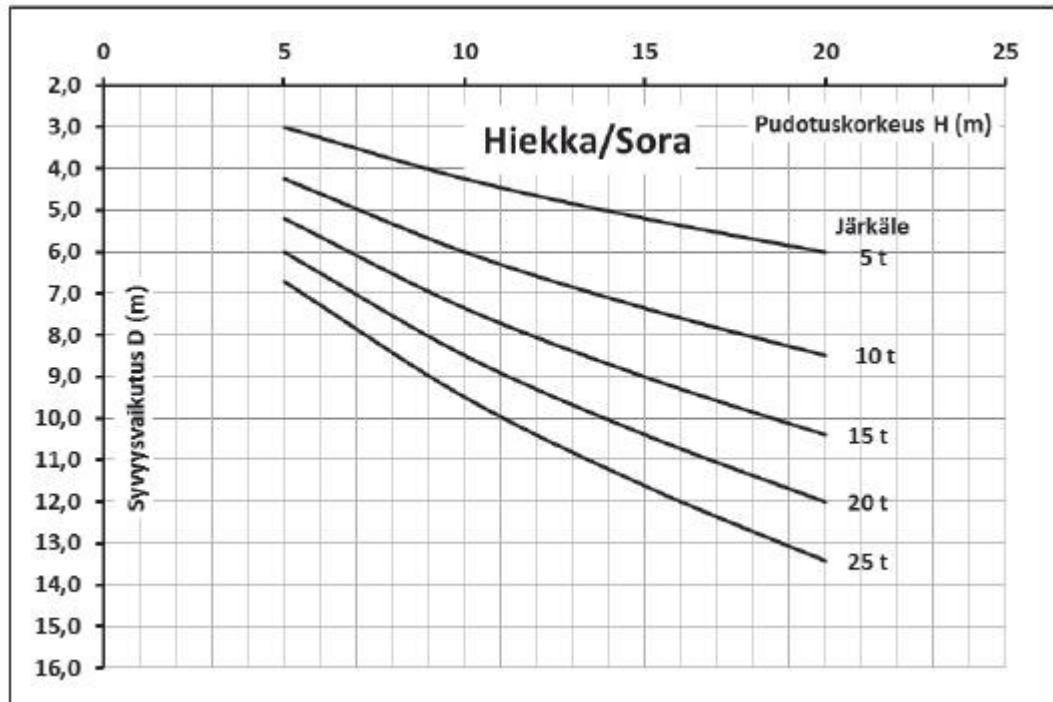
missä D_{max} on enimmäissyvyysvaikutus metreinä, W on järkäleen paino tonneina, H on pudotuskorkeus metreinä ja k on maalajista riippuva kokeellinen kerroin (Lukas 1995, Havukainen 2013 mukaan).

Louhetäytöllä pudotustiivistyksen syvyysvaikutukset ulottuvat parhaimmillaan noin 18 m syvyyteen. Tällöin pudotus tapahtuu 20 m korkeudelta ja järkäleen massa on 25 t. Louhetta voi tiivistää syvälle verrattuna muihin materiaaleihin. Esimerkiksi hiekalla ja soralla syvyysvaikutus on parhaimmillaan noin 13,5 m. (Havukainen 2013) Louheen pudotustiivistyksen syvyysvaikutusta pudotuskorkeuksien suhteen erimassaisilla järkäleillä on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Louhetäytön pudotustiivistyksen syvyysvaikutus (Havukainen 2013)

Hiekalla ja soralla pudotustiivistyksen syvyysvaikutus on hieman pienempi kuin louhetäytöllä. Niillä syvyysvaikutus pudotuskorkeuksien suhteen erilaisilla massoilla on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7: Pudotustiivistysten syvyysvaikutus hiekalla ja soralla (Havukainen 2013)

Nopeaiskutiivistyksessä 9-16 tonnin järkälettä isketään maahan noin sekunnin välein. Isku tapahtuu kiihdyttämällä järkälettä ohjainputken sisällä noin 1,2 m korkeudelta maahan. Menetelmän syvyysvaikutus on noin 8 metriä, joten se soveltuu kohteisiin, joissa vesisyvyys on suhteellisen matala. Energian siirtyminen maahan on pudotustiivistystä tehokkaampaa, koska pudotusalusta pysyy koko ajan maassa kiinni. (Havukainen 2013)

Vibrotiivistyksessä maata tiivistetään täryttävän sauvan ja vesihuhtelun yhteisvaikutuksella. Värähtelevä sauva upotetaan maahan vesisuihkun avulla liikutteleamalla sitä pystysunnassa. Sauvan värähtely tiivistää ympäröivää maata sitä mukaa kun sauvaa nostetaan ylöspäin. Lopuksi sauvan lähelle maanpintaa muodostama tyhjätila täytetään ja tiivistetään. Menetelmän syvyysvaikutus voi parhaimmillaan olla jopa 50 m. Kivipilarimenetelmä on vibrotiivistystä muistuttava menetelmä, jossa ei käytetä vesisuihkua. Menetelmässä täryttävää sauvaa nostettaessa muodostuva tyhjätila täytetään karkealla kiviaineksella paineilman avulla. Kivipilarimenetelmä soveltuu hienommille, ja vibrotiivistys karkeammille maakerroksille. (Havukainen 2013)

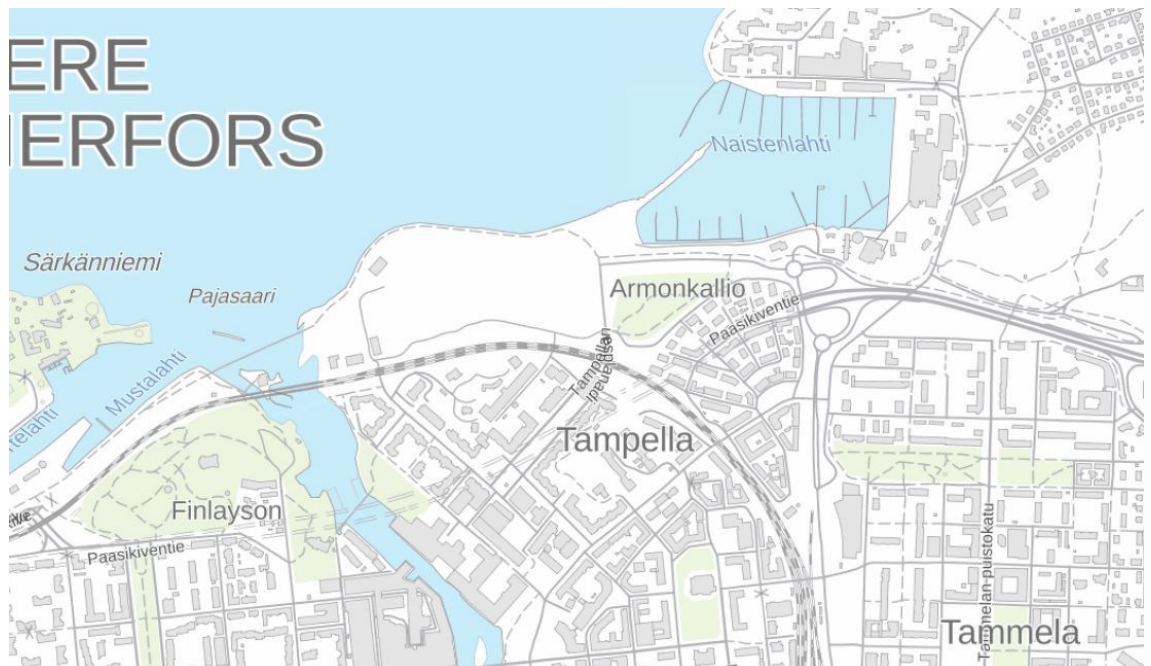
Tiivistystyön vaikutusta voidaan arvioida siirtymäputkien avulla. Yksi tai useampia putkia sijoitetaan koekentän ulkopuolella, ja niiden siirtymien perusteella voidaan arvioida tiivistystyön syvyysvaikutusta. Tiivistystyötä voidaan tarkkailla myös järkäleeseen kiinnitetyn PDA-mittauslaitteiston avulla. Kitkamailla voidaan käyttää myös kairausta, jolloin kärkivastuksen kasvamisen perusteella saadaan tietoa maan tiivistymisestä. Pudotustiivistystyön aiheuttamia painumia seuraamalla saadaan tietoa täytön kokoonpuristumisesta.

Painumat ovat pudotustiivistyksellä yleensä noin 2–5 % tiivistettävän kerroksen paksuudesta. (Havukainen 2013)

4. RANTA-TAMPELLAN ESIMERKKITAPPAUS

4.1 Kohteen kuvaus

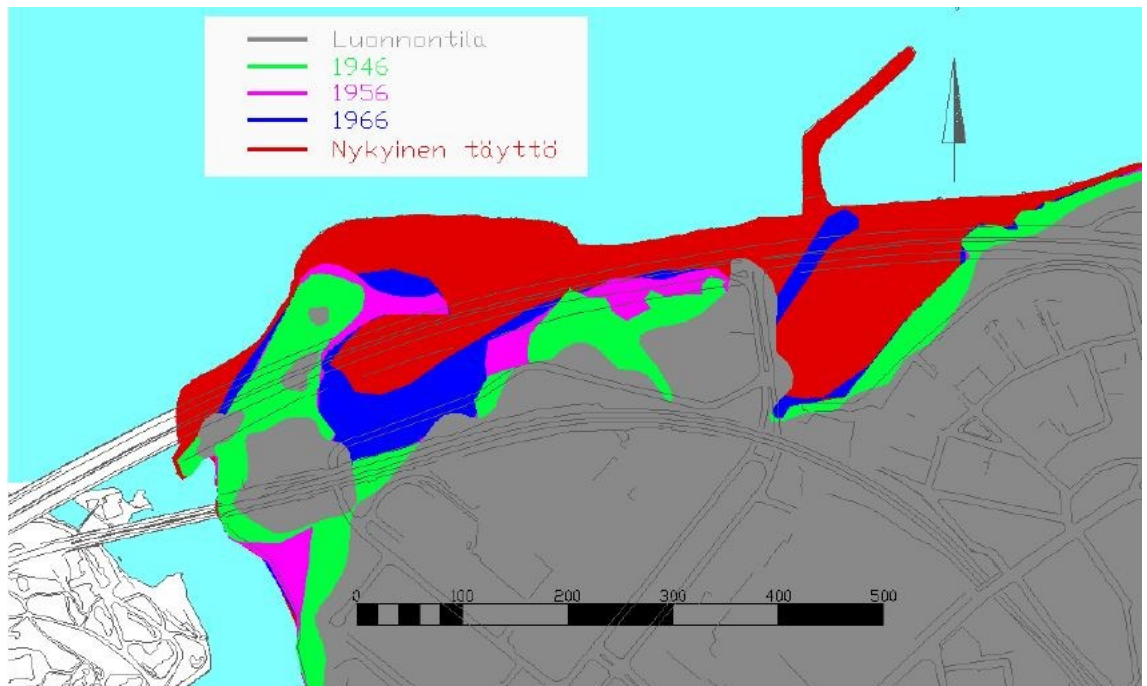
Ranta-Tampellan alue sijaitsee Tampereella keskustan pohjoispuolella Näsijärven rannassa, missä alue sijoittuu Tammerkosken ja Naistenlahden väliin. Kuvassa 8 Ranta-Tampella näkyy Tampereen kartalla lähes rakentamattomana alueena. Kaikki uudet vesistötäytöt on jo rakennettu, ja ne näkyvät kartalla.



Kuva 8. Ranta-Tampellan alue kartalla (Maanmittauslaitos)

Uutta vesistötäyttöä rakennettiin vanhasta rannan tasosta noin 10 metriä eteenpäin alueen länsiosissa ja itäosissa noin 25–30 m. Lisäksi rakennettiin Massunlastenpuiston alue, jonka kohdalla täyttöä rakennettiin enimmillään 75 m vanhasta rannasta eteenpäin. Ranta-Tampellan alueelle rakennetaan noin 3 500 asukkaan uusi asuinalue. (Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto 2013) Täytetyn alueen kokoa voidaan havainnollistaa asettamalla voimassa oleva asemakaava vuoden 1995 ilmakuvan päälle, mikä on esitetty kuvassa 9.

paksuus on 1–8 m itäosissa aluetta ja 17–20 m länsiosissa. Täytöt ovat paikoitellen syrjäyttäneet pohjamaata ja paikoin tiivistäneet sitä. (Tyynelä 2010) Kuvassa 10 on esitetty alueen täyttöhistoria ennen uusimpia Rantatunnelin louheesta rakennettuja täyttöjä.



Kuva 10. Ranta-Tampellan täyttöhistoria ennen uusinta louhetäyttöä (Tyynelä 2010)

Vanhojen täyttöjen ulkopuolella järven pohjassa maaperä on yleispiirteiltään silttiä ja savista silttiä (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018). Länsiosissa on ohuehkoja 1–2 m paksuja silttikerroksia, jotka muuttuvat itää kohti savisemmiksi ja 7–12 m paksuiksi. Pehmeiden kerrosten alla on moreenia, mutta idässä pehmeiden kerrosten alla on hiekkaa ennen moreenia. Kallionpinta on noin 19–30 m syvyydessä rannan alueella. Pohjavedenpinta on alueella Näsijärven pinnan tasolla. (Tyynelä 2010)

4.3 Louhetäyttö

Käytetty täyttömateriaali oli Rantatunnelin rakentamisesta saatua louhetta, joka oli rae-kooltaan louheeksi hienoa, pääosin noin 0–300 mm. Mukana oli myös suurempiakin, jopa noin kuution kokoisia lohkaraita. Vesistötäytöissä ideaalia olisi karkearakeisempi louhe, koska se syrjäyttäisi pohjamaata hieman paremmin. Hienon louheen pinta kuitenkin kiilautui hyvin, joten erillistä kiilauskerrosta ei tarvittu. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018) Täytössä käytettyä louhetta näkyy kuvassa 11.



Kuva 11. Rantatunnelista saatua louhetta (Mansikkamäki 2018)

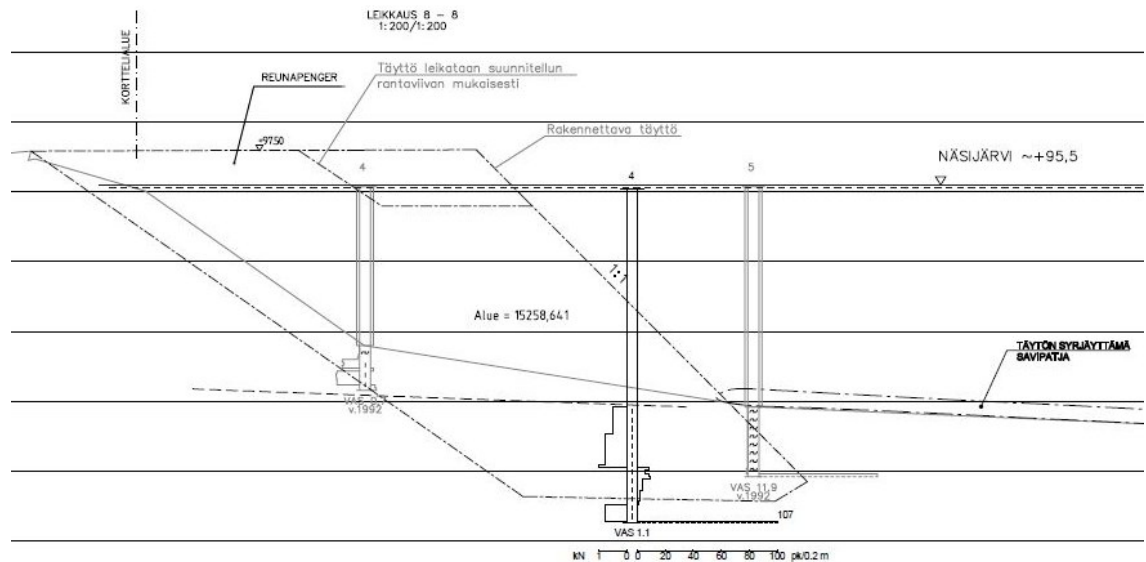
Louhetta ei hyödynnetty varsinaisissa rakenteissa, mutta rakennuspohjana se on hyvin kantava ja routimaton. Louhetta jouduttiin kaivamaan pois talojen anturoiden kohdalta, missä se vaihdettiin vaatimusten mukaiseen murskeeseen. Myös puiston rakennekerrosten tieltä jouduttiin paikoin kaivamaan louhetta pois. Käytetyssä louheessa ei ole mitään ympäristöongelmia aiheuttavia veteen liukenevia haitta-aineita. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

4.4 Täytön mitoitusperusteet ja suunnittelu

Uusia rakennuksia ei juurikaan rakenneta uuden louhetäytön päälle, mutta se on silti välttämätön niiden rakentamisen kannalta. Ilman uutta täyttöä alueen kokonaisstabiileetti ei olisi riittävä, vaikka talot perustetaankin paaluille. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018) Täytön reunan taso on saatu suoraan kokonaisstabiileettitarkasteluista, joissa kokonaisvarmuuden vähimmäisarvoksi on määritetty 1,8. Mikäli rantaa ei tuettaisi ollenkaan uudella täytöllä, jouduttaisiin talot rakentamaan 15–20 m päähän rantaviivasta, mikä pienentäisi selvästi rakentamiskäyttöön soveltuvia alueita. (Tyynelä 2010) Uuden täytön päälle rakennetaan kuitenkin puistoaluetta ja kevyen liikenteen väylä. Toinen merkittävä syy täytön rakentamiselle on ollut Rantatunnelin rakentamisesta saatava louhe, jota on yhteensä saatu yli 0,5 milj. m³. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Täytön riittävästä varmuudesta sortumista vastaan voidaan varmistua syrjäyttämällä pehmeät pohjamaat niin, että louhetäyttö on kontaktissa tiiviiden maakerrosten kanssa (Tyynelä 2010). Työtavaksi valittiin päätypengerrys, koska järven pohjan ruoppaaminen ei olisi järkevää suuresta vesisyvyydestä ja järviolosuhteiden tuomien rajoitusten vuoksi. Mitoituksessa perusoletuksena on se, että pehmeitä maita jää aina jonkin verran louhetäytön alle. Savinen siltti on kuitenkin sen verran karkeaa, että se on lujuudeltaan suhteellisen hyvää. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Päätypengerrystyöstä saadaan suoraan täytön luiskakaltevuus järvestä, joka on noin 1:1. Rannan vakavuuden varmistamiseksi rantaan rakennetaan porras, joka mahdollistaa myös aallonmurtajan rakentamisen myöhemmin. Porras rakennetaan erikseen täytön rakentamisen jälkeen. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018) Uuden täytön profiili korttelialueen kohdalla on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Poikkileikkausprofiili uudesta täytöstä (Ramboll)

Kuvassa näkyy rannan porras, Näsijärven pinta, päätypengerrysten syrjäyttämä savi-
patja, rakennettavan alueen raja sekä pohjatutkimuksia. Poikkiviivojen väli kuvassa tar-
koittaa viittä metriä. Täytön alaosa ulottuu tämän poikkileikkauksen kohdalla noin tasolle
+73 m. Näsijärven pinnan taso on noin +95,5 m, ja täytön pinta on sitä 2 m korkeammalla
tasolla +97,5 m.

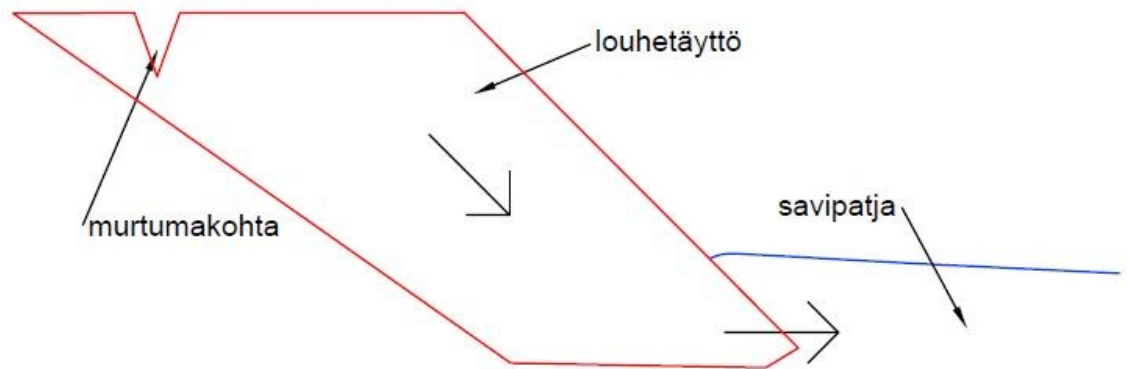
4.5 Pengerrystyö

Päätypengerryksellä oli kohteessa kaksi toiminnallista tarkoitusta: toimia louhetäytön ra-
kentamisen menetelmänä ja syrjäyttää pehmeitä maita järven pohjasta. Ruoppausta ei
valittu massanvaihdon menetelmäksi suuresta vesisyvyydestä johtuen. Pitkäpuominen
kaivinkone ylettyisi noin 10 metriin, mutta Ranta-Tampellassa vesisyvyys on tätä enem-
män. Imuruoppauksella pystyttäisiin ruoppaamaan syvemmälle, mutta sen ongelmana
ovat suuret määrät ylijäämämassoja. Lisäksi järviolosuhteisiin ei päästä meriolosuhtei-
den ruoppauskalustolla. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Päätypengerrysten pohjamaata syrjäyttävää vaikutusta tehostettiin kohteessa ainoas-
taan tekemällä pengertä ylikorkeana. Mahdollisia lisäkeinoja, joita olisi ollut myös mah-
dollista hyödyntää olivat räjäytykset sekä häirintä pitkäpuomisella kaivinkoneella. Ranta-

Tampellassa vesisyvyys on niin suuri, että pelkkä ylikorkean penkereen oma paino oli riittävän suuri syrjäyttämään savea. Matalilla penkereillä syrjäyttävä vaikutus on hankalampi saada aikaan. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Pohjan savien siirtymät eivät tapahtuneet välittömästi, vaan vasta jonkin ajan kuluessa. Kohteessa olevat savet ovat ominaisuuksiltaan sellaisia, että riittävien muodonmuutosten jälkeen saven lujuus ei putoa niin kuin tyypillisillä suomalaisilla savilla, vaan pysyy samana vaikka siirtymien kehittyminen jatkuisikin. Tästä syystä louhetäytön pinnalla näkyi murtumavyöhyke, vaikka todellisuudessa kyse oli pohjan savien hitaasta syrjäytymisestä ja painumisesta eikä täytön stabiliteetin menetyksestä. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018) Kuvassa 13 on havainnollistettu louhen pinnan murtuman syntymistä.



Kuva 13. Louhetäytön pinnan murtuman syntyminen

Kuvassa 14 näkyy rakennusvaiheessa syntynyt murtumavyöhyke.



Kuva 14. Louhetäytön rakentamisen jälkeinen painuman aiheuttama murtuma (Mansikkamäki)

Ranta-Tampellan laaja-alaisin täyttö Massunlastenpuiston kohdalla oli alun perin tarkoitus rakentaa tekemällä ensin reunapenger louheesta ja täyttää sisäosa heikommalla materiaalilla. Siitä kuitenkin luovuttiin, koska vesisyvyys oli suuri ja alla oli paksu kerros pehmeää savea. Täyttö saattoi sortua rantaviivasta ja turvallisuussyyt olivat tärkein peruste menetelmästä luopumiselle. Louhetta oli myös niin hyvin saatavilla, että heikoman materiaalin käytölle ei ollut tarvetta. Kaikki täytöt tehtiin siis päätypengerryksellä. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018) Ranta-Tampella vesistötäyttöjen rakentamisen jälkeen näkyy kuvassa 15.



Kuva 15. Ilmakuva valmiista täytöstä (Maanmittauslaitos)

Kuvan ottohetkellä rantaan on jo rakennettu kevyen liikenteen väylä ja ensimmäisen kerrostalon rakentaminen vanhan täytön päälle aivan uuden louhetäytön rajalle on alkanut.

4.6 Tiivistäminen

Kohteessa syvätiivistettiin pieni alue, jossa osa kerrostalosta rakennetaan uuden louhetäytön päälle. Vanhaa täyttöä tai mitään muita uusia louhetäyttöjä ei syvätiivistetty. Tiivistysmenetelmäksi valittiin pudotustiivistys ja sen tarkoituksena oli tiivistää louhetäyttöä ja nopeuttaa myöhemmin lähes koko alueelle rakennettavan painopenkereen vaikutusta. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Ennen varsinaista tiivistystyötä pudotuksia tehtiin pienemmällä pudotuskorkeudella ja mitattiin täyttöalueen lähellä kulkevien kaukolämpö- ja maakaasuputkien tärinää ja siirtymiä. Kun voitiin varmistua niiden säilymisestä, aloitettiin varsinainen tiivistystyö oikealla pudotuskorkeudella. Kaikki pudotuskierrokset tehtiin samalla järjälleellä ja yhteensä tehtiin noin 10–15 pudotusta per kohta. Lukasin kaavassa käytetty pudotusenergia oli noin

150 tm. Tiivistävä vaikutus ylettyi noin 10 metrin syvyyteen ja täytön paksuus siinä kohdassa on noin 20 metriä, joten syvälle täyttöön jäi vielä myös vähemmän tiivistynyttä louhetta. Kriteerinä riittävälle tiivistymiselle oli kahden viimeisimmän pudotuksen yhteenlaskettu painuma, jonka tuli alittaa ennalta määritetty raja-arvo. Lopuksi tiivistystyön onnistumista arvioitiin kokonaispainuman perusteella. Painumat olivat suuruudeltaan 0,5–1,0 metriä. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

4.7 Painumat ja sivusiirtymät

Lähes koko alue sekä vanhan että uuden täytön alueella esikuormitettiin painopenkereellä, jonka korkeus oli 4–6 m. Pienellä osalla aluetta on vuosina 1998–1999 ollut louheen varastointikasa, joten sille alueelle ei rakennettu painopengertä. Pohjatutkimusten perusteella painuma-ajan arvioitiin olevan puolesta vuodesta 1,5–2 vuoteen. Toteutuneet painumat vastasivat arviota hyvin. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

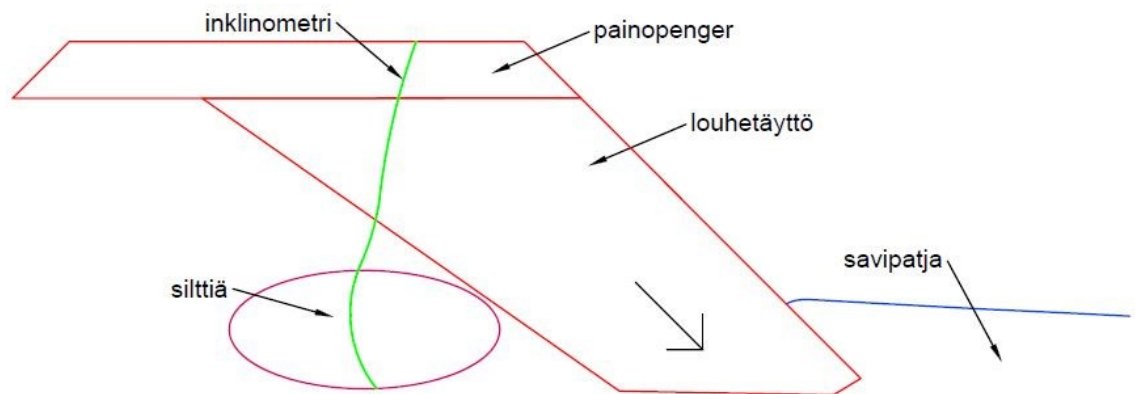
Painumia mitattiin painumamittareilla, jotka olivat betonilaattoihin kiinnitettyjä terästanjoja. Betonilaatat rakennettiin vesistötäytön perustasoon ja vasta niiden päälle rakennettiin painopenger, jotta painopenkereen sisäistä painumista ei mitattaisi. Terästanjoista mitattiin x-, y- ja z-koordinaatit, joten niistä saatiin tietoa sekä painumista että sivusiirtymistä. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Suuruudeltaan painumat olivat 5–30 cm ja niistä suurimmat mitattiin vanhan ja uuden täytön rajan tuntumassa, missä vanhan täytön alle jääneet silttikerrokset olivat painuneet. Uusi louhetäyttö on tukevalla pohjalla, joten rantaviivan lähellä mitatut painumat ovat olleet pieniä. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Lisäksi käytössä oli kuusi inklinometriä uuden ja vanhan täytön rajalla tulevien rakennusten edustalla (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018). Inklinometri toimii siten, että kulma-anturi mittaa kulmaa verrattuna maan vetovoimaan. Inklinometriputki porataan mitattavan maan läpi kovaan pohjaan asti, koska mittauksissa halutaan tietoa juuri siirtymistä kovan pohjan suhteen. (Luomala 2010) Ranta-Tampellassa käytettiin manuaalisia inklinometrejä, joilla mittauksia tehtiin kerran kuukaudessa. Automaattisissa inklinometreissä kaltevuusmittarit lähettävät määrävälein tietoa niiden asemasta serverille. Mittatarkkuudet inklinometreillä ovat noin 1–0,3 mm luokkaa. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Sivusiirtymähavainnot kohteessa olivat pieniä, mikä johtuu osittain siitä, että inklinometrejä ei asennettu heti painopenkereen rakentamisen jälkeen. Penkereen annettiin ensin aiheuttaa suurimmat painumat, jotta suuret liikkeet eivät rikkoisi inklinometrejä. Mitatut

sivusiirtymät olivat suuruudeltaan enimmillään noin 2 cm. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018) Kuvassa 16 on havainnollistettu inklinometrien käyttäytymistä.



Kuva 16. Inklinometrin käyttäytyminen

Inklinometrin yläosan lievä kallistuminen johtuu täytön helman painumisesta järven pohjassa. Vanhan täytön ja uuden louhetäytön raja-alueilla olevat silttikerrokset ovat painuneet, mikä on johtanut inklinometrin alaosan pullistumiseen. Se taas näyttää inklinometrin mittaustuloksissa sivusiirtymältä, mutta johtuu todellisuudessa ainoastaan painumisesta. Mikäli kohteessa olisi stabiliteettiongelmia, inklinometrit näyttäisivät ylempien kerrosten siirtyvän järveen päin. Tässä tapauksessa liukupinta olisi jo muodostunut ja murtuminen olisi hitaasti alkanut tapahtua. Kohteessa inklinometriin siirtymät ovat kuitenkin vain painumista johtuvia, vaikka siirtymiä tapahtuukin järveä kohti. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

4.8 Ympäristövaikutusten hallinta

Ranta-Tampellan alueella tai sen läheisyydessä ei ole luonnonsuojelukohteita, joihin hankkeen vaikutukset olisivat voineet ylettyä. Alue oli aiemmalta käytöltään ollut rakentamattomana varastokenttänä, joten merkittäviä ympäristöarvoja sillä ei ole ollut. Näsijärven pohjaeläimistö ennen täytön rakentamista täyttöalueella oli vähäistä sekä laji- että yksilömäärältään. (Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto 2013)

Ennen työtä on arvioitu, että järven pohjan savea syrjäytyy päätypengerryksen seurauksena noin 60 000 m³. Ympäristöministeriön julkaisemassa Sedimenttien ruoppaus- ja läjitysohjeessa olevista pilaantuneen sedimentin raja-arvoista Ranta-Tampellassa ylittyy yhteensä kahdeksan. Lisäksi 11 haitta-aineella pitoisuudet ovat kohonneita, mutta kuitenkin alle pilaantuneen raja-arvon. (Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto 2013)

Vanhat täyttömaat ovat pääosin tuhkaa, betonia ja tiiltä, jotka ovat jätettä. Vanha täyttö on siis ainakin osittain pilaantunutta maata. Koko alueella on tästä syystä johtuen tehty massanvaihto Näsijärven pinnan tasoon, missä pilaantuneet maat on korvattu puhtaalla murskeella. Vanhat täytöt kuitenkin jäivät uuden louhetäytön alle, joten suurta ympäristöhaittaa niistä ei päässyt aiheutumaan. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Päätypengerryksen seurauksena haitta-aineita sisältävä savi lähti liikkeelle, mikä oli merkittävin ympäristöhaittojen aiheuttaja (Mansikkamäki 2018). Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintoviraston päätöksen (2013) mukaan rakentamisen seurauksena vesi voi sameta ja sen kiintoainespitoisuus voi nousta, minkä seurauksena veteen voi vapautua tribuutyyliä, PAH-yhdisteitä ja raskasmetalleja. Oletettavasti kuitenkin herkästi liukenevat aineet ovat liuenneet, koska aineet ovat jo kauan olleet järven pohjassa kontaktissa veden kanssa. Riskinä ihmisille on haitta-aineiden kulkeutuminen kalojen syömisen kautta, mutta riskiä voidaan pitää pienenä. (Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto 2013). Työn aikana Näsijärven ja Tammerkosken veden laatua seurattiin vesilain mukaisen luvan velvoittamana. Silttiverhon käytöllä haitat pystyttiin rajaamaan koskemaan vain pientä aluetta. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

Suurimmat ongelmat Ranta-Tampellan vesistöäytön rakentamisessa liittyivät silttiverhon käyttöön. Päätypengerryksen seurauksena pohjan savi lähti pöllyämään ja tarttui silttiverhoon, joka oli viranomais määräyksestä johtuen asennettu virheellisesti pohjaan asti. Verhoon kiinnittynyt savi painoi sitä alaspäin rasittaen sen kiinnitykseen käytettyä ponttoonivaijeria ja pyrki vetämään sitä veden pinnan alle. Verhoa jouduttiin korjaamaan useaan kertaan rakennusaikana. Verho tulisi asentaa hieman irti pohjasta, jotta siihen kiinni jäänyt sedimentti ei aiheuttaisi siihen turhia rasituksia. Verho olisi tullut sijoittaa myös kauemmaksi rannasta, mutta sei ei ollut mahdollista Näsijärvessä sijaitsevan kaa-suputken takia. (Mansikkamäki, haastattelu 22.3.2018)

5. YHTEENVETO

Vesistötäytöt toimivat hyvänä ratkaisuna saada käyttöön uutta rakennuskelpoista maata. Suomessa vesistötäyttöjen rakentamiseen liittyy usein täyttöön soveltuvan materiaalin hyvä saatavuus esimerkiksi kalliorakennuskohteista, joista saatava louhe on ominaisuuksiltaan hyvin vesistötäyttöihin soveltuvaa. Samalla ratkaistaan ongelma materiaalin sijoittamisesta. Maailmalla useissa kaupungeissa vesistötäyttöjä rakennetaan, koska tarve uudelle rakennuskelpoiselle maalle on hyvin suuri. Tällöin materiaalina käytetään usein esimerkiksi ruopattua hiekkaa. Myös pehmeämpien materiaalien, kuten saven käyttö voi olla mahdollista, jos hyvin soveltuvaa materiaalia ei ole helposti saatavilla. Savea ei kuitenkaan sellaisenaan voi käyttää, vaan se tulisi esimerkiksi massastabiloida.

Suurimmat käytön asettamista vaatimuksista liittyvät painumiin. Jos alueelle tulee sijoittamaan rakennus, on käytön aikainen sallittu painuma vähemmän kuin esimerkiksi puistoalueella. Painumaan vaikuttaa ensisijaisesti täytön alla olevien pehmeiden maakerrosten painuminen. Toinen painumiin vaikuttava tekijä on täytön tiiviys. Täyttöä tulisi tiivistää tarpeen mukaan syvätiivistyksellä, jonka teho tulee valita täytön paksuuden ja täyttömateriaalin perusteella. Myös painopenkereellä voidaan tiivistää täyttöä, mutta sen ensisijainen tarkoitus on tiivistää täytön alle mahdollisesti jääviä pehmeitä maakerroksia.

Stabiliteetin osalta tulee ottaa huomioon pohjamaan-, täytön- sekä kokonaisstabiliteetti. Stabiliteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat maakerrosten ja täytön materiaalien ominaisuudet sekä maakerrosten ja täytön paksuudet. Lisäksi stabiliteettiin vaikuttaa täytön luiskakaltevuus ja rakennusten sijoittuminen täytön päällä.

Vesistötäytön rakennusmenetelmät riippuvat hyvin paljon kohteen olosuhteista. Ensimmäinen työvaihe on usein pehmeiden maakerrosten poistaminen. Meriolosuhteissa tähän yleisin menetelmä on ruoppaus. Ruoppausmenetelmä tulee valita ruopattavan materiaalin ja ruoppaussyvyyden mukaan. Ruoppauksella voidaan vaihtoehtoisesti myös hankkia vesistötäyttöön käytettävää materiaalia, kuten esimerkiksi merihiekkaa. Järviolosuhteissa massanvaihto päätypengerryksellä voi olla usein ainoa vaihtoehto, koska meriolosuhteiden ruoppauskalustoa ei voida tuoda sisävesille.

Täyttötyö tehdään Suomessa tyypillisesti maalta, jolloin materiaali hankitaan maalta ja täyttöä rakennetaan kohti haluttua tasaa. Ruopattua materiaalia voidaan tuoda kohteeseen proomuilla, jolloin täyttö voidaan rakentaa hydraulisella täytöllä, hiekan levityksellä tai pohjaluukkuproomuilla. Kohteen ominaisuudet ja käytetty materiaali määrittelevät

sen, mitä menetelmää tulisi käyttää. Täyttö voidaan rakentaa myös rantasuojauksen sisään, jolloin voidaan käyttää heikompia materiaaleja. Tulevaisuudessa vesistötäyttöjen rakentamisen haastavuutta lisäävät entistä syvemmät täyttökohteet ja hyvin soveltuvien täyttömateriaalien puute.

Ranta-Tampellassa louheesta rakennettua vesistötäyttöä käytettiin tukemaan olemassa olevaa täyttöä. Täyttö rakennettiin päätypengerryksellä, jonka avulla se saatiin kiinni koivaan pohjaan. Uutta 10–25 m leveää täyttöä ei suurimmilta osin syvätiivistetty. Ainoastaan osuus, jonka kohdalle oli suunniteltu rakennus, tiivistettiin pudotustiivistyksellä. Vanhaa ja uutta täyttöä kuormitettiin painopenkereellä lähes koko alueella. Painumia ja sivusiirtymiä seurattiin painumatangoilla ja inklinometreillä. Niiden perusteella havaittiin 5–30 cm painumia, jotka olivat suurimmillaan vanhan ja uuden täytön väliin jääneistä silttikerroksista johtuvia. Uusi louhetäyttö ei juurikaan painunut, vaikka sitä ei syvätiivistetty. Inklinometreillä havaitut sivusiirtymät johtuivat vanhan ja uuden täytön väliin jääneiden silttikerrosten painumista sekä päätypengerryksellä syrjäytyneiden savien painumisesta. louhetäytön edessä olevien savien painumien takia täytön pintaan muodostui murtumia, jotka eivät kuitenkaan johtuneet stabiliteettiongelmista.

Ranta-Tampellan esimerkkitapauksen perusteella voidaan todeta, että tunnelirakennuskohteesta saatu louhe on vesistötäyttöihin hyvin soveltuva materiaali. Tärkeä havainto on myös se, että suurimmat painumat ja siirtymät johtuvat täytön alle jäävistä materiaaleista, jos varsinainen täyttömateriaali on hyvin soveltuvaa ja se on tiivistetty kohteeseen soveltuvalla tavalla. Suositeltavaa on, että pehmeät maakerrokset tulisi pyrkiä poistamaan uuden vesistötäytön alta.

LÄHTEET

Bo, M. W. & Choa, V. (2009). Reclamation and Ground Improvement, Gale Asia.

Chu, J. & Guo, W. (2016). Land reclamation using clay slurry or in deep water: challenges and solutions, Japanese Geotechnical Society Special Publication. Saatavissa: https://www.istage.jst.go.jp/article/jgssp/2/51/2_TC217-02/pdf/-char/en

Forsman, J., Jyrävä, H., Lahtinen, P., Niemelin, T. & Hyvönen, I. (2014). Massa-stabilointikäsikirja, Ramboll, Luopioinen & Espoo. Saatavissa: http://www.uusi-omaarakentaminen.fi/sites/default/files/Massastabilointik%C3%A4sikirja%20YLEISVERSIO%20-%202014_06_24.pdf

Havukainen, J. (2013). Syvätiivistys, Rakentajan kalenteri 2013, Rakennustieto Oy, Helsinki. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK130502.pdf>

Hartikainen, O-P. (2007). Maarakennustekniikka, 11. painos, Otatieto, Helsinki.

Helsingin kaupunkitilaohje (2016). Luiskaverhoukset ja eroosiosuojaukset. Helsinki. Saatavissa: <http://kaupunkitilaohje.hel.fi/kortti/luiskaverhoukset/>

Häkkänen, J. (2014). Perustaminen esirakennetun louhetäytön varaan, diplomityö, Helsinki. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/14107>

Jääskeläinen, R. (2011). Geotekniikan perusteet, 3. painos, Tammertekniikka, Jyväskylä.

Jan De Nul Group. Saatavissa: <http://www.jandenul.com/en/equipment/fleet/backhoe-dredger> Viitattu 8.6.2018

Kalliainen, A., Luomala H., Jäniskangas T., Nurmikolu A. & Kolisoja P. (2011). Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011, Liikennevirasto, Helsinki. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2011-10_radan_eristys_web.pdf

Lukas, R. G. (1995). Dynamic Compaction, Geotechnical Engineering Circular No. 1, Federal Highway Administration Office of Technology Applications, Washington, D.C. Saatavissa: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/009754.pdf>

Luomala, H. (2010). Ratapenkereiden monitorointi, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010, Liikennevirasto, Helsinki. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2010-22_ratapenkereiden_monitorointi_web.pdf

Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto (2013). Päättös nro: 103/2013/2, Ranta-Tampellan rakentaminen Näsijärven vesialuetta täyttämällä ja töiden aloittamislupa. Saatavissa: https://www.avi.fi/documents/10191/56888/lssavi_paatos_102_2013_2_2013_12_12.pdf/cc5f5e44-bf1c-4d0a-a468-cd1323cff35d

Maanmittauslaitos, Karttapaikka (2018). Saatavissa: <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/>

Mansikkamäki, J. TkT, Geotekninen suunnittelija, Ramboll, Tampere. Haastattelu 22.3.2018.

Nauska, J. & Havukainen, J. (1998). Esirakentaminen 1998, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Tiedote 77/1998, Helsinki.

Rantamäki, M., Jääskeläinen R. & Tamminrinne, M. (2009). Geotekniikka, 22. muuttamaton painos, Otatieto, Helsinki.

Tampereen Karttapalvelu (2018). Saatavissa: <http://kartat.tampere.fi/oskari>

Tamminrinne, M. (1974). Louhe Rakennuspohjana, Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 13, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi.

Tyynelä, P. (2010). Ranta-Tampellan alueen rakentaminen, Ramboll, Tampere. Saatavissa: https://www.tampere.fi/ytoteto/aka/nahtavillaolevat/8333/selvitykset/liite13a_alueen_rakentaminen.pdf